

文章编号: 1000-5773(2009)05-0338-07

# 0.5~4.0 GPa、100~300 °C 条件下 辉长岩弹性波速及衰减特征\*

陈 志<sup>1</sup>, 杜建国<sup>1</sup>, 周文戈<sup>2</sup>, 刘永刚<sup>2</sup>, 李 莹<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;

2. 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳 550002)

**摘要:**报道了 100~300 °C、0.5~4.0 GPa 条件下辉长岩纵波速度( $v_P$ )和横波速度( $v_S$ ), 并且根据品质因子( $Q_P$ 、 $Q_S$ )的变化讨论了该条件下辉长岩的物性特征及其地震地质意义。实验结果表明:压力为 0.5~4.0 GPa 时,固定温度下辉长岩  $v_P$ 、 $v_S$ 、 $Q_P$ 、 $Q_S$  随压力增大而递增,并且在 0.5~2.3 GPa 压力范围内它们随压力的变化率比在 2.3~4.0 GPa 范围内的大;固定压力下,温度从 100 °C 增至 300 °C 时,辉长岩  $v_P$ 、 $v_S$ 、 $Q_P$ 、 $Q_S$  呈线性下降趋势。进一步分析得到:在 0.5~2.3 GPa 压力下,随着压力的增加辉长岩样品不断被压缩,样品的连续性变好,弹性加强,弹性波衰减变小,波速与  $Q$  值升高;在 2.3~4.0 GPa 压力下,样品被压密,样品接近连续弹性介质,弹性波衰减很小,波速与  $Q$  值的变化速率变小;在温度为 100~300 °C 条件下,辉长岩样品内部以膨胀为主,样品密度变小,弹性波速与  $Q$  值呈线性下降趋势。研究结果表明,在岩石圈内构造应力局部集中会导致岩石  $Q$  值增大,岩石破裂、热物质局部聚集会导致岩石  $Q$  值降低,这也解释了地震前后观测到的震源区  $Q$  值的类似变化。

**关键词:** 高温高压; 辉长岩; 弹性波速; 品质因子; 地震

**中图分类号:** P584      **文献标识码:** A

## 1 引 言

地震发生前后,孕震介质品质因子  $Q$  会发生变化,引起  $Q$  变化的原因主要有裂缝状态、热物质运动、应力变化等<sup>[1]</sup>。地震前,震源区及周围介质处于应力加速积累的过程。介质裂隙闭合,蠕滑加速,弹性强度增大,地震波传播的能量耗损减小, $Q$  值增高<sup>[2]</sup>。1998 年山西临猗 5.0 级地震前后,西安数字地震遥测台网测控区的  $Q$  值在地震发生前为 87~203,而震后为 67~164,震前震中区附近出现了明显异常的高  $Q$  值<sup>[3]</sup>。1983 年山东菏泽 5.9 级地震前震中  $Q$  值为 270,而震后为 160,震后恢复正常<sup>[4]</sup>。

在地球内部温压条件下,测量岩石矿物的弹性波速是探测壳幔物质组成和物性变化的有效途径。目前,高温高压下岩石圈部分岩石矿物的弹性波速及其与温度、压力、密度、破裂、各向异性、脱水以及部分熔融等之间的关系已有不少报道,尤其是对岩石矿物的纵波速度  $v_P$  的测量研究<sup>[5-13]</sup>。相同温压条件下结构和组分不同的岩石矿物可能具有相同的  $v_P$ ,因此仅依据  $v_P$  反演岩石圈精细组构存在很大的不确定性<sup>[14-17]</sup>。高温高压下岩石圈中灰岩、闪长岩、辉长岩、榴辉岩、麻粒岩等大部分岩石的纵波速度  $v_P$  和横波速度  $v_S$  的原位测量为揭示岩石圈组构及其演化提供了实验资料<sup>[18-26]</sup>,但大部分实验压力低于

\* 收稿日期: 2008-12-31; 修回日期: 2009-02-20

基金项目: 地震科学基金(B07002); 国家自然科学基金(40703013)

作者简介: 陈 志(1983-),男,硕士研究生,主要从事岩石物理研究. E-mail: dugu\_830822@163.com

通讯作者: 杜建国(1956-),男,博士,研究员,主要从事资源环境和地质灾害方面研究. E-mail: jianguodu@hotmail.com

1.0 GPa。此外,由于实际晶体中往往存在点缺陷、线缺陷、表面缺陷和体缺陷<sup>[27]</sup>,所以除了利用波速测量来研究岩石矿物的弹性性质外,还应研究岩石的衰减。对泥岩、砂岩、灰岩、橄榄岩衰减的实验研究表明, $Q$ 值反应岩石矿物物理状态的变化比波速值灵敏得多<sup>[28-31]</sup>。在1.0 GPa、800~1240 °C条件下,橄榄岩的 $v_p$ 和 $Q_p$ 随温度增加而快速降低,体积分数为3%的水或1%的熔体会导致 $v_p$ 降低6.8%、 $Q_p$ 降低35.0%<sup>[32]</sup>。但是,已有的实验研究中外加压力较低,其中大部分只研究了岩石的 $Q_p$ ,关于岩石 $Q_s$ 的研究甚少,而且前人还没有关于利用高温高压下岩石 $Q$ 值模拟实验探讨地震前后震源区 $Q$ 值变化特征的研究。因此,本工作在100 °C、200 °C、300 °C的温度和0.5~4.0 GPa的准静水压条件下,原位测量了下地壳中的典型成分辉长岩的波速( $v_p$ 、 $v_s$ )和品质因子( $Q_p$ 、 $Q_s$ ),研究了高温高压下辉长岩的物性变化特征,探讨了实验结果对于解释地震前震源区的 $Q$ 值异常和低速高导层形成的参考意义。

## 2 样品与实验

实验样品为辉长岩,辉长结构,致密块状,密度为3.1 g/cm<sup>3</sup>,矿物组成和相应的质量分数为:辉石35%、斜长石45%、橄榄石10%、黑云母8%、磁铁矿2%<sup>[9]</sup>。将辉长岩样品加工成高(6±0.05) mm、直径(10±0.05) mm的圆柱体,在120 °C下烘烤24 h以除去吸附水。实验测量中的缓冲棒均为铅棒。

实验是在中国科学院地球化学研究所地球深部物质实验室 YJ-3000 t 压力机上进行的。压力的标定采用铜熔融曲线及石英-柯石英相变法,误差小于0.01 GPa;温度标定采用 NiCr-NiAl 热电偶,误差小于5 °C<sup>[33]</sup>。

辉长岩弹性波速测量采用脉冲透射-反射法<sup>[12]</sup>。实验过程中,首先以5 °C/min的速率升温到设定温度,恒温10 min使样品温度均匀,然后再以0.01 GPa/min的速率加压到0.5 GPa,稳定10 min后测量波速,压力间隔为0.2 GPa。采用 TDS784A 型数字示波器进行弹性波走时和波形的测量,采样间隔为4 ns,纵波探头中心频率为4 MHz,横波探头中心频率为2 MHz。弹性波走时测量精度可达2 ns,纵波和横波通过辉长岩样品的走时一般在0.9 μs和1.6 μs左右,样品长度的测量误差为0.05 mm, $v_p$ 和 $v_s$ 的测量误差分别在1.0%和0.9%以内。辉长岩衰减的研究采用超声波振幅比法<sup>[34-36]</sup>,测量的绝对误差很难精确确定,其精确度只能通过可重复性判断<sup>[29]</sup>。本实验两次测量辉长岩 $Q$ 值的相对误差为0.1%~19%,平均误差为13%。

## 3 实验结果

### 3.1 波速随温度、压力的变化

在实验温压条件下,辉长岩的 $v_p$ 和 $v_s$ 随压力增加而增大,如图1、图2所示。从图中可以看出,在较高压力下(2.3~4.0 GPa),辉长岩的 $v_p$ 、 $v_s$ 随压力的增长幅度明显低于较低压力下(0.5~2.3 GPa)的增长幅度,且 $v_p$ 随压力的增长幅度较 $v_s$ 的大。300 °C恒温下,当压力由0.5 GPa升至2.3 GPa时, $v_p$ 、

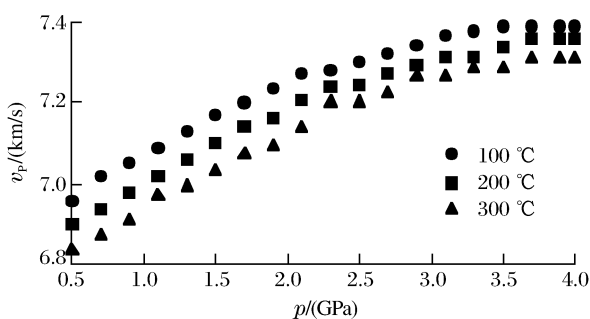


图1 在100、200和300 °C下辉长岩 $v_p$ 随压力的变化关系  
Fig. 1 The variation of  $v_p$  with pressure at temperatures of 100, 200 and 300 °C

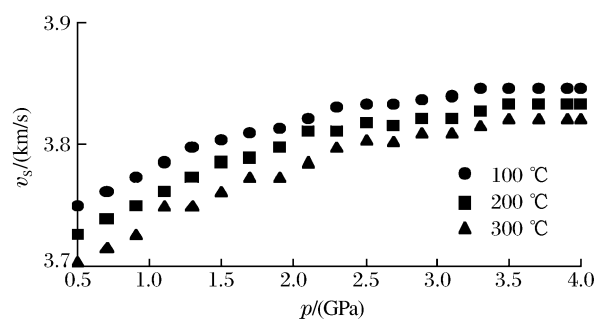


图2 在100、200和300 °C下辉长岩 $v_s$ 随压力的变化关系  
Fig. 2 The variation of  $v_s$  with pressure at temperatures of 100, 200 and 300 °C

$v_s$  分别由 6.8 km/s、3.7 km/s 增至 7.2 km/s、3.8 km/s, 增大了 5.9% 和 2.7%; 当压力由 2.3 GPa 升至 4.0 GPa 时,  $v_p$  由 7.2 km/s 增至 7.3 km/s, 增大了 1.4%,  $v_s$  则增大了 0.5%。

恒定压力下, 辉长岩的  $v_p$  和  $v_s$  随温度升高而降低, 如图 1、图 2 所示。从中可以看出, 0.5~2.3 GPa 压力下  $v_p$  和  $v_s$  随温度的下降速率高于 2.3~4.0 GPa 压力下的下降速率, 且  $v_p$  随温度的下降速率较  $v_s$  的大。在 0.5~2.3 GPa 压力区间, 恒定压力下  $v_p$ 、 $v_s$  随温度升高(由 100 °C 升至 300 °C), 其下降速率分别为  $(3.8\sim 7.3)\times 10^{-4}$  km/(s·°C) 和  $(1.2\sim 2.4)\times 10^{-4}$  km/(s·°C); 而在 2.3~4.0 GPa 压力区间, 恒定压力下  $v_p$ 、 $v_s$  随温度升高(由 100 °C 升至 300 °C), 其下降速率分别为  $(3.8\sim 5.0)\times 10^{-4}$  km/(s·°C) 和  $(1.2\sim 1.8)\times 10^{-4}$  km/(s·°C)。

### 3.2 品质因子随温度、压力的变化

图 3 为 100 °C、1.1 GPa 条件下 P 波通过铝样品与辉长岩样品的波形、首达波频谱和频谱比。为了排除 Rayleigh 散射的影响, 在频谱比值与频率曲线中选取频率  $f$  在 (1.5 MHz, 8 MHz) 区间段进行直线拟合<sup>[37-38]</sup>, 拟合直线的斜率  $k$  与弹性波穿过样品的走时  $t$  和品质因子  $Q$  有如下关系<sup>[29,34,36]</sup>

$$Q = \pi t / k \quad (1)$$

利用拟合的  $k$  值, 可以求得 100 °C、200 °C 和 300 °C 下压力为 0.5~4.0 GPa 时的辉长岩的  $Q_p$ 、 $Q_s$  值。

在本实验的温压条件下, 辉长岩的  $Q_p$ 、 $Q_s$  随压力增加而增大, 如图 4、图 5 所示。从图中可以看出, 较高压力下 (2.3~4.0 GPa) 辉长岩  $Q_p$ 、 $Q_s$  随压力的增长幅度明显低于较低压下 (0.5~2.3 GPa) 的增长幅度, 相同压力下  $Q_s$  稍大于  $Q_p$ 。100 °C 恒温下: 当压力由 0.5 GPa 升至 2.3 GPa 时,  $Q_p$ 、 $Q_s$  分别由 44、57 增至 152、197, 都增大了 245.6%; 当压力由 2.3 GPa 升至 4.0 GPa 时,  $Q_p$ 、 $Q_s$  分别由 152、197 增至 180、229, 增大了 18.4% 和 16.2%。200 °C 恒温下: 当压力由 0.5 GPa 升至 2.3 GPa 时,  $Q_p$ 、 $Q_s$  分别由 37、39 增至 135、175, 增大了 264.9% 和 348.7%; 当压力由 2.3 GPa 升至 4.0 GPa 时,  $Q_p$ 、 $Q_s$  分别由 135、175 增至 179、223, 增大了 32.6% 和 27.4%。300 °C 恒温下, 当压力由 0.5 GPa 升至 2.3 GPa 时,

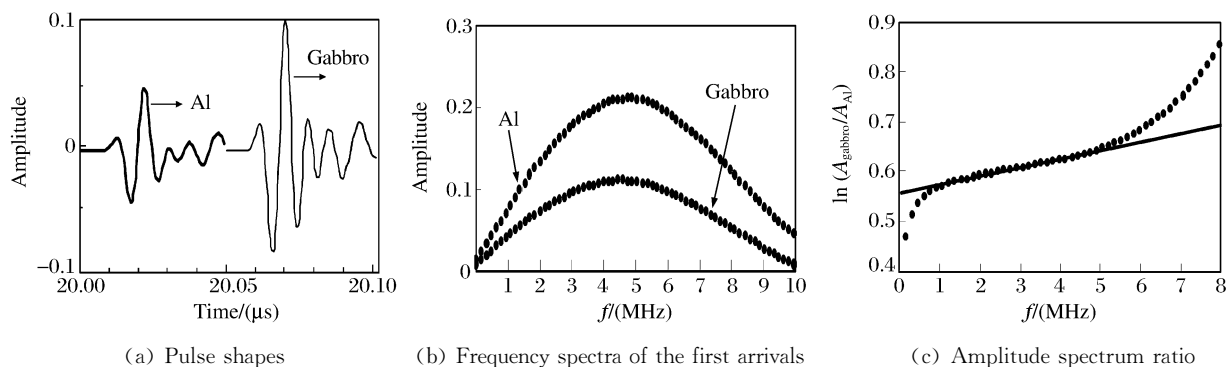


图 3 100 °C、1.1 GPa 条件下通过铝样品和辉长岩样品的 P 波  
Fig. 3 P waves through aluminum and gabbro at 1.1 GPa and 100 °C

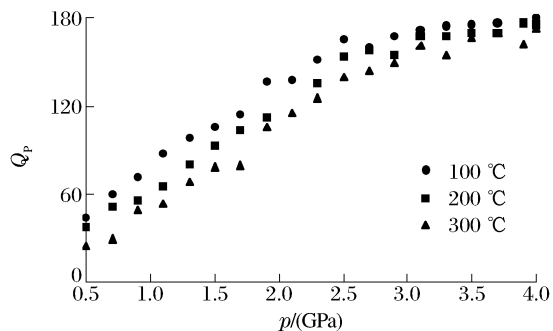


图 4 在 100、200 和 300 °C 下辉长岩  $Q_p$  随压力的变化  
Fig. 4  $Q_p$ - $p$  plot at temperatures of 100, 200 and 300 °C

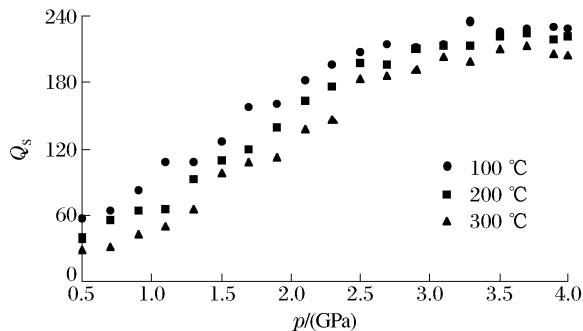


图 5 在 100、200 和 300 °C 下辉长岩  $Q_s$  随压力的变化  
Fig. 5  $Q_s$ - $p$  plot at temperatures of 100, 200 and 300 °C

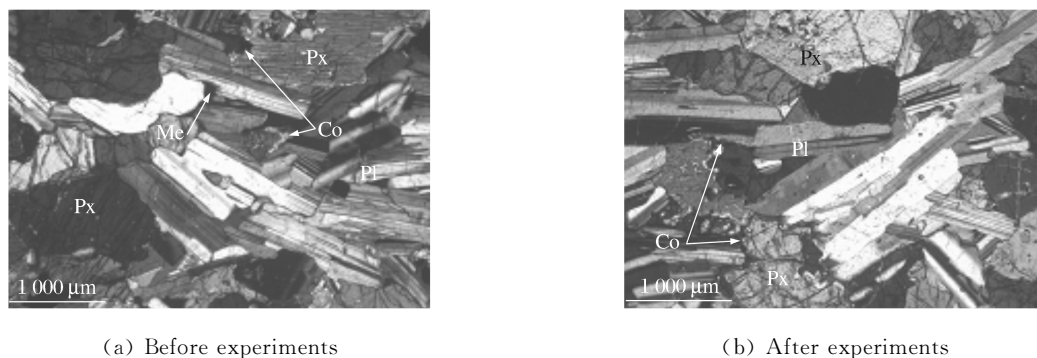
$Q_P$ 、 $Q_S$  分别由 26、29 增至 118、146, 增大了 353.8% 和 403.4%; 当压力由 2.3 GPa 升至 4.0 GPa 时,  $Q_P$ 、 $Q_S$  分别由 118、146 增至 174、205, 增大了 47.5% 和 40.4%。

恒定压力下, 辉长岩的  $Q_P$ 、 $Q_S$  随温度升高而下降, 如图 4、图 5 所示。0.5~2.3 GPa 压力下,  $Q_P$ 、 $Q_S$  随温度升高(由 100 °C 升到 300 °C) 其下降速率分别为  $(0.09 \sim 0.17) \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  和  $(0.13 \sim 0.28) \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; 而在 2.3~4.0 GPa 压力下,  $Q_P$ 、 $Q_S$  随温度升高(由 100 °C 升到 300 °C) 其下降速率分别为  $(0.03 \sim 0.13) \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  和  $(0.06 \sim 0.13) \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

## 4 讨 论

实验结果表明, 辉长岩样品的  $v_P$ 、 $v_S$ 、 $Q_P$ 、 $Q_S$  对温度和压力的响应存在差异, 并且  $Q_P$ 、 $Q_S$  随温度和压力的变化幅度较  $v_P$ 、 $v_S$  大。也就是说, 相对于声波速度, 岩石的品质因子对温度和压力的响应更大些, 这与橄榄石的测定结果一致<sup>[32]</sup>。

在本实验的温压条件下, 辉长岩样品的矿物组成无变化(见图 6), 因此实验测得的  $v_P$ 、 $v_S$ 、 $Q_P$ 、 $Q_S$  随温度和压力的变化主要取决于辉长岩样品内部结构的变化。已有的研究表明, 当  $p > 0.5$  GPa 时, 岩样中大部分裂缝已经闭合。利用显微镜观察实验前后辉长岩样品(见图 6), 结果显示: 矿物颗粒边界较清晰; 在矿物颗粒边界及晶内解理和裂缝内有暗色充填物, 这些暗色填充物具有不透光性, 主要是实验前样品内部矿物高温高压析出的金属氧化物(Me); 部分辉石(Px)颗粒被浅色条带状矿物包围, 这些浅色条带状矿物是实验前辉石边缘热液交代作用形成的反应边(Co)。因此, 本实验中岩石内部的结构变化以矿物压缩为主。



(a) Before experiments

(b) After experiments

图 6 实验前后辉长岩样品正交偏光下的显微照片

Fig. 6 Photos of original and run samples with a microscope (+)

声波通过介质时, 介质内各质点的振动速度不同, 存在速度梯度, 介质内摩擦力对相邻质点的相对运动起阻碍作用, 使声能不断转变为热能, 造成声波的衰减, 且该情况在两种媒介接触面处表现得特别强烈<sup>[39]</sup>。所以, 本实验中当超声波通过岩样时, 样品中的内摩擦力会造成超声波的衰减。与样品寄主矿物相比, 浅色条纹长英质矿物粘滞性较强, 弹性波通过时能量衰减较大, 而超声波通过不同矿物接触面时, 能量衰减更大。因此, 本实验中超声波的衰减主要发生在浅色条纹长英质矿物内及岩样内部各界面处。当压力增加时, 样品内部矿物被压缩, 弹性增强, 连续性变好, 内摩擦力变小, 弹性波通过时衰减变小, 波速与  $Q$  值增大; 随着压力继续增加, 样品内矿物被压密, 岩样变为近似连续弹性介质, 内摩擦力很小, 通过样品的弹性波衰减很小, 波速与  $Q$  值的增长速率变小。此外, 由于实验样品由多种不同矿物组成, 在相同压力下不同矿物的压缩系数存在差异, 因此开始加压时在不同矿物的接触面处会产生相对滑移。这种发生在颗粒边界的滑移, 一方面通过接触面的摩擦将部分机械能转化为热能, 另一方面在接触面处产生微断层, 促使通过样品的弹性波发生衰减。当压力增大时, 样品内矿物被不断压缩, 产生的微断层逐渐消失, 压缩系数差异变小, 相对运动变弱, 弹性波衰减变小, 波速与  $Q$  值均增加; 随着压力继续增加, 样品内矿物被压密, 内部各矿物压缩系数相近, 相对运动很弱, 弹性波衰减很小, 波速与  $Q$  值增



长速率变小。综上所述,0.5~2.3 GPa 压力下辉长岩样品内部矿物的压密可能是导致 2.3~4.0 GPa 下辉长岩弹性波速与  $Q$  值随压力增长的速率变小的主要原因。

随着温度的升高,岩石矿物内部将发生膨胀、脱水以及熔融等反应,进而引起样品弹性波速与  $Q$  值的变化。已有的研究表明:恒压下,随着温度升高(20~600 °C),岩石膨胀,波速通常线性下降<sup>[9,40]</sup>。本实验结果显示,固定压力下,温度从 100 °C 升至 300 °C 时辉长岩  $v_p$ 、 $v_s$ 、 $Q_p$ 、 $Q_s$  呈缓慢线性下降趋势,可以推测该温度条件下样品内部以膨胀为主,样品密度变小,弹性波速与  $Q$  值下降。2.3~4.0 GPa 压力下,样品已被压缩到致密,温度的影响变小, $v_p$ 、 $v_s$ 、 $Q_p$ 、 $Q_s$  下降速率变低。

地球物理研究表明,在地震孕育过程中震中区及其附近孕震介质的  $Q$  值由于区域应力集中而增大<sup>[2,4]</sup>。地震发生后,深部热流体在震源区局部富集,岩体温度上升、密度降低,波速及  $Q$  值下降<sup>[3,32]</sup>。虽然实验压力不等同于应力,但是由应力的定义(用假想截面将物体截开,在截面上一点  $P$  的周围取一微元  $\Delta S$ ,设  $\Delta S$  的外法线为  $\nu$ , $\Delta S$  上的力为  $\Delta F$ ,如果极限  $\lim_{\Delta S \rightarrow 0} (\Delta F/\Delta S) = T_\nu$  存在,则称  $T_\nu$  为  $P$  点在该截面上的应力)可知,当实验样品形状和体积一定时,实验压力与应力呈线性关系。因此,我们的实验结果在解释地震前后震源区  $Q$  值的变化以及低速高导层的形成是有意义的。

## 5 结 论

(1) 对于反映温度和压力对岩石样品内部结构的影响,测量品质因子要比测量弹性波速更有效。

(2) 在 0.5~2.3 GPa 压力下,随着压力增加,辉长岩样品被不断压缩,使得样品的弹性加强、连续性变好、内摩擦力变小、弹性波吸收变小,同时矿物的压缩系数差异变小、相对运动变弱、弹性波衰减变小,因此波速与品质因子均增加。在 2.3~4.0 GPa 压力下,样品已被压密,样品接近连续弹性介质,内摩擦力极小,相对运动很弱,通过样品的弹性波衰减很小,波速与品质因子的变化速率变小。

(3) 100~300 °C 下,辉长岩内部以膨胀为主,样品密度变小,弹性波速与品质因子呈线性下降趋势。在 2.3~4.0 GPa 压力下,样品已被压密,温度对波速和品质因子的影响变小,随着温度升高波速和品质因子的下降幅度变小。

感谢中国科学院贵阳地球化学研究所郭捷研究员在实验数据测量过程中的指导。

## References:

- [1] Zhou L Q, Zhao C P, Xiu J G, et al. Means and Development of Quality Factor by Nature Earthquakes [J]. Recent Development in World Seismology, 2008, (2): 1-12. (in Chinese)  
周连庆, 赵翠萍, 修济刚, 等. 利用天然地震研究地壳  $Q$  值的方法和进展 [J]. 国际地震动态, 2008, (2): 1-12.
- [2] Wei S Z, Li Y P. Variation of  $Q$ -Value in the Crust and Stress-Drop of Small Shocks around Datong Earthquake [J]. Earthquake, 1992, (2): 30-38. (in Chinese)  
韦士忠, 李玉萍. 大同地震前后介质  $Q$  值及小震震源参数的变化 [J]. 地震, 1992, (2): 30-38.
- [3] Wang W D, Zhang Y Z, Di X L, et al. Coda  $Q$  Anomalies of 1998 Linyi  $M_L$  5.0 Earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2004, 19(4): 25-29. (in Chinese)  
王卫东, 张永志, 狄秀玲, 等. 1998 年临猗 5.0 级地震前  $Q$  值的前兆异常 [J]. 灾害学, 2004, 19(4): 25-29.
- [4] Guo A X, Diao S Z, Xue G. Quality Factors of the Inshore Mediums and Characters of the Earthquakes in Jiaodong Region [J]. Journal of Seismology, 1990, (3): 65-69. (in Chinese)  
郭爱香, 刁守中, 薛 革. 胶东及其沿海介质品质因子  $Q$  值及地震活动特征 [J]. 地震学刊, 1990, (3): 65-69.
- [5] Christensen N I. Compressional Wave Velocities in Possible Mantle Rocks to Pressures of 30 kbar [J]. Journal of Geophysical Research, 1974, 79(24): 407-412.
- [6] Jackson I, Paterson M S, Niesler H, et al. Rock Anelasticity Measurements at High Pressure, Low Strain Amplitude and Seismic Frequency [J]. Geophysical Research Letters, 1982, 11(12): 1235-1238.
- [7] Zhao Z D, Gao S, Luo T C, et al. Origin of the Crustal Low Velocity Layer of Qinling and North China: Evidence from Compressional Wave Velocities in Rocks at High  $PT$  Conditions [J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(2): 251-259.
- [8] Darot M, Reuschle T. Acoustic Wave Velocity and Permeability Evolution during Pressure Cycles on a Thermally

- Cracked Granite [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(7): 1019-1026.
- [9] Bai L P. The Experimental Studies on Electrical Conductivities and P-Wave Velocities of Gabbro and Anorthosite at High Pressure and High Temperature [D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2001: 1-20. (in Chinese)  
白利平. 高温高压下辉长岩、斜长岩纵波速度与电学性质实验研究 [D]. 北京: 中国地震局分析预报中心, 2001: 1-20.
- [10] Bai L P, Du J G, Liu W, et al. The Experimental Studies on Electrical Conductivities and P-Wave Velocities of Anorthosite at High Pressure and High Temperature [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 15(6): 667-676.
- [11] Bai L P, Du J G, Liu W, et al. P-Wave Velocities and Conductivity of Gabbro at High Pressures and High Temperatures [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(9): 895-908.
- [12] Liu W, Du J G, Bai L P, et al. Compressional Elastic Wave Velocities of Serpentinized Pyroxenite at High Pressures and Temperatures and Its Geological Significance [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 15(4): 456-461.
- [13] Butt S D, Frempong P K, Mukherjee C, et al. Characterization of the Permeability and Acoustic Properties of an Outburst-Prone Sandstone [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2006, 58(1): 1-12.
- [14] Wu Z X, Guo C H. Experimental Measurement of  $v_p$  on the Crust Rocks of Hebei Province at High Temperature and Pressure [J]. *Progress of Geophysics*, 1993, 8(4): 206-213. (in Chinese)  
吴宗絮, 郭才华. 冀东陆壳岩石在高温高压下波速的实验研究 [J]. *地球物理学进展*, 1993, 8(4): 206-213.
- [15] Christensen N I, Mooney W. Seismic Velocity Structure and Composition of the Continental Crust: A Global View [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(B7): 9761-9788.
- [16] Gao S, Kern H, Jin Z M, et al. Poisson's Ratio of Eclogite: The Role of Retrogression [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 192(4): 523-531.
- [17] Sang Z N, Zhou Y S, He C R, et al. An Experimental Study on Partial Melting of Gabbro and Its Geological Implication [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(4): 385-392. (in Chinese)  
桑祖难, 周永胜, 何昌荣, 等. 辉长岩部分熔融实验及地质学意义 [J]. *地质科学*, 2002, 37(4): 385-392.
- [18] Kern H. P- and S-Wave Velocity in Crustal and Mantle Rocks under the Simultaneous Action of High Confining Pressure and High Temperature and the Rock Microstructure [A]// *High-Pressure Research in Geoscience [C]*. Schweizerbart, Stuttgart, 1982: 15-45.
- [19] Kern H, Schenk V. Elastic Wave Velocities in Rocks from a Lower Crustal Section in Southern Calabria [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 1985, 40(3): 147-160.
- [20] Kern H, Burlini L, Ashchepkov I. Fabric-Relate Seismic Anisotropy in Upper-Mantle Xenoliths: Evidence from Measurements and Calculation [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 1996, 95(3-4): 195-209.
- [21] Kern H, Popp T, Gorbatshevich F, et al. Pressure and Temperature Dependence of  $V_p$  and  $V_s$  in Rocks from Superdeep Well and from Surface Analogues at Kola and the Nature of Velocity Anisotropy [J]. *Tectonophysics*, 2001, 338(2): 113-134.
- [22] Ou X G, Jin Z M, Jin S Y, et al. Possible Seismic Reflector in the Lower Crust: Evidence from Fabrics and Experiments of Seismic Velocity on Layered Gabbro at High Temperature and High Pressure [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(9): 914-920.
- [23] Kitamura K, Ishikawa M, Arima M. Petrological Model of the Northern Izu-Bonin-Mariana Arc Crust: Constraints from High-Pressure Measurements of Elastic Wave Velocities of the Tanzawa Plutonic Rocks, Central Japan [J]. *Tectonophysics*, 2003, 371(1-4): 213-220.
- [24] Nishimoto S, Ishikawa M, Arima M, et al. Laboratory Measurement of P-Wave Velocity in Crustal and Upper Mantle Xenoliths from Ichino-Megata, NE Japan: Ultrabasic Hydrous Lower Crust beneath the NE Honshu Arc [J]. *Tectonophysics*, 2005, 396(3-4): 245-259.
- [25] Punturo R, Kern H, Cirrincione R, et al. P- and S-Wave Velocities and Densities in Silicate and Calcite Rocks from the Peloritani Mountains, Sicily (Italy): The Effect of Pressure, Temperature and the Direction of Wave Propagation [J]. *Tectonophysics*, 2005, 409(1-4): 55-72.
- [26] Ji S, Wang Q, Marcotte D. P Wave Velocities, Anisotropy and Hysteresis in Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks as a Function of Confining Pressure [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: 1-24.
- [27] Friedel J. Dislocation [M]. Translated by Wang Y. Beijing: Science Press, 1984: 1-10. (in Chinese)  
弗里埃德尔. 位错 [M]. 王 煜, 译. 北京: 科学出版社, 1984: 1-10.
- [28] Li S J, Shi X J, Ye L, et al. Analysis on Relation between Rock Quality Factor and Seismic Wave Velocity in Zungaria Basin [J]. *Inland Earthquake*, 2001, 15(3): 224-231. (in Chinese)  
李生杰, 施行觉, 叶 林, 等. 准噶尔盆地岩石品质因子与速度分析 [J]. *内陆地震*, 2001, 15(3): 224-231.
- [29] Liu W, Du J G, Xie H S, et al. Elastic P Wave Velocity and Attenuation in Dunite up to 4.0 GPa [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(4): 293-298. (in Chinese)  
刘 巍, 杜建国, 谢鸿森, 等. 4.0 GPa 压力下纯橄岩弹性纵波速度和衰减的实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2005, 19

- (4):293-298.
- [30] An Y, Mou Y G, Fang C L. The Relation between Attenuation and Physical Characters of Rocks [J]. *Geophysical Exploration*, 2006, 41(2):188-192. (in Chinese)  
安 勇, 牟永光, 方朝亮. 沉积岩的速度、衰减与岩石物理性质间的关系 [J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(2):188-192.
- [31] Liu W G, Shan Y M, Liu R H. Study on Ultrasonic Attenuation in the Process of Rock Dilatancy by Amplitude Spectrum Ratio [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2006, 33(6):611-616. (in Chinese)  
刘维国, 单钰铭, 刘荣和. 砂岩扩容过程中超声波衰减的实验研究 [J]. *成都理工大学学报*, 2006, 33(6):611-616.
- [32] Du J G, Xie H S. From Atom to the Earth—Advances in High Pressure Geoscience [M]. Beijing: Seismological Press, 2007:127-132. (in Chinese)  
杜建国, 谢鸿森. 从原子到地球——高压地球科学研究进展 [M]. 北京: 地震出版社, 2007:127-132.
- [33] Xie H S, Zhang Y M, Xu H G, et al. A New Method of Measuring the Elastic Wave Velocity of Rocks and Minerals at High Pressures and High Temperatures and Its Significance [J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 1993, 36(10):1276-1280.
- [34] Liu W, Du J G, Bai L P, et al. Ultrasonic P-Wave Velocity and Attenuation in Pyroxenite under 3.0 GPa up to 1170 °C [J]. *Chin Phys Lett*, 2003, 20(1):164-166.
- [35] Walsh J B. Seismic Wave Attenuation in Rock Due to Friction [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, 71:2591-2599.
- [36] Toksöz M N, Jackson D H, Timur A. Attenuation of Seismic Waves in Dry and Saturated Rocks: I Laboratory Measurements [J]. *Geophysics*, 1979, 44(4):681-690.
- [37] Liu Z P, Wu X W, Chu Z H. Laboratory Study of Acoustic Parameters of Rock [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(5):659-666. (in Chinese)  
刘祝萍, 吴小微, 楚泽涵. 岩石声学参数的实验测量及研究 [J]. *地球物理学报*, 1994, 37(5):659-666.
- [38] Wang B S, Sun D Y, Li S J. The Effect of Heterogeneity on Rock's Ultrasonic Attenuation and Its Correction [J]. *Earthquake Research in China*, 2001, 17(1):1-7. (in Chinese)  
王宝善, 孙道远, 李生杰. 非均匀性对超声衰减的影响及其修正 [J]. *中国地震*, 2001, 17(1):1-7.
- [39] Ma D Y. Noise and Vibration Control Engineering Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2002:251-404. (in Chinese)  
马大猷. 噪声与振动控制工程手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002:251-404.
- [40] Christensen N I. Compressional Wave Velocities in Rocks at High Temperatures and Pressures, Critical Thermal Gradients, and Crustal Low-Velocity Zones [J]. *J Geophys Res*, 1979, 84(B12):6849-6857.

## Wave Velocity and Attenuation Characteristics of Gabbro at 100~300 °C and 0.5~4.0 GPa

CHEN Zhi<sup>1</sup>, DU Jian-Guo<sup>1</sup>, ZHOU Wen-Ge<sup>2</sup>, LIU Yong-Gang<sup>2</sup>, LI Ying<sup>1</sup>

(1. *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;*

2. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)*

**Abstract:** The variations of the elastic properties of gabbro at 100~300 °C and 0.5~4.0 GPa and the seismogeological application of the experimental results are discussed based on the measured wave velocities ( $v_p$ ,  $v_s$ ) and quality factors ( $Q_p$ ,  $Q_s$ ) of the gabbro. The values of  $v_p$ ,  $v_s$ ,  $Q_p$  and  $Q_s$  increase in the pressure range from 0.5 to 4.0 GPa at the given temperatures, but decrease slightly when the temperature increase from 100 to 300 °C at the given pressures. The variations of velocities and quality factors may be mainly attributed to the compression of the gabbro sample, and the continuity and elasticity of the sample become better at 0.5~2.3 GPa. The gabbro sample almost becomes continuous elastic medium at 2.3~4.0 GPa, resulting in smaller change of elastic wave velocities and attenuation. The wave velocities and quality factors decrease with increasing temperature because of thermal expansion and density decrease of gabbro. The experimental results can be used to explain the observed geophysical phenomena that the quality factor are enhanced by stress aggregation in the lithosphere, the quality factors may be reduced by rock fracturation and local enrichment of hot fluids in the epicentral areas before and after earthquake occurrence.

**Key words:** high temperature and high pressure; gabbro; wave velocity; quality factor; earthquake